基于 Gaussian算法的高压直流平抗瓦斯非线性耦合动态特性精细化建模

郑伟杰
（国家电网仿真中心“电网安全与节能国家重点实验室”，中国电力科学研究院，北京市 100192）

HVDC Smoothing Reactor Gas Relay Non-linear Coupled Dynamic Characteristics Detailed Model based on Gaussian Algorithm

Zheng Weijie
(State Grid Simulation Center “State Key Laboratory of Power Grid Safety and Energy Conservation”， China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: In recent years, with large number of HVDC projects access to AC system, bring important influence to AC-DC combined power grid, operation condition of DC system especially the performance of the control and protection system has become important factor in AC / DC hybrid power grid security and stability. System failure caused the smoothing reactor gas relay malfunction is one of the main causes of non- electrical quantity factors of DC block, this paper analyzes the principle and characteristics of smoothing reactor gas relay equipment, nonlinear coupling characteristics of smoothing reactor gas relay mechanical vibration and DC shock current is modelled and decoupled using Gaussian regression algorithm, which is compatible with the electromagnetic transient simulation algorithm, and pure electromagnetic simulation using the paper proposed model in East China power grid AC / DC power grid actual engineering example, which can detailed describe the nonlinear quickly dynamic response characteristics for electric factors AC / DC power grid fault shock current dynamic changes to non-electrical quantity smoothing reactor gas relay mechanical vibration acceleration. It provide key technical means for many practical engineering smoothing reactor gas relay malfunction caused DC block accident analysis and fault prevention, and equipment improvement, which is of important practical significance for further improving the multi-dimensional accuracy of HVDC practical engineering simulation, and provides the mentality for the detailed modeling of other nonlinear electrical related equipment.

基金项目：国家自然科学基金（51477158）；国家电网科技项目(XT71-16-016)-直流控制保护与受端电网配合性能提升技术研究。
Project Supported by National Science Foundation of China (51107124)；State Grid Technology Project of China(XT71-16-016)。

KEY WORDS ： HVDC ； Commutation Failure ； Smoothing Reactor Gas Relay ； Non-Electrical Quantity; Non-linear Dynamic Characteristics

摘要：随着近几年来大量高压直流输电工程接入交流系统，给交直流混联电网带来重要影响，直流系统的运行状况，尤其是其控制保护系统的性能，已成为影响交直流混联电网安全稳定的重要因素。系统故障引发平波电抗器瓦斯保护误动作是导致直流系统闭锁的重要非电气量因素之一，本论文详细研究分析了平抗瓦斯的设备原理和特点，采用 Gaussian 回归算法对平抗瓦斯机械振动与冲击电流的非线性耦合特性进行精细化模拟和解耦，且与电磁暂态算法相兼容，并基于国网仿真中心华东电网 ADPSS 纯电磁暂态实际工程控保算例进行交直流电网纯电磁仿真，可以详细描述交直流电网故障冲击电流等电气量动态变化对平抗瓦斯机械振动加速度非电气量的非线性快速响应动态特性，为实际工程中多次发生的平抗瓦斯误动导致直流闭锁的事故分析和故障重演、预防以及设备改进提供关键技术手段，对于进一步提高直流实用化工程仿真的多维度精度具有重要现实意义，并为其他非线性电气相关设备的详细建模提供思路。

关键词：高压直流；换相失败；平抗瓦斯保护；非电气

量；非线性动态特性

1 引言

高压直流输电以在远距离大容量送电及电网异步互联方面的优势，在我国“西电东送，全国联网”战略中发挥了重要作用 [1-3] ，我国已建设了多个大容量、远距离超 / 特高压直流输电通道，目前，全国共有二十余项直流输电工程建成投产，最高电压等级为 ±800kV ，最大输送容量为 800 万千瓦 [4-6] 。同时，为落实我国大气污染防治行动计划，国家电网还将规划建设四回特高压直流输电通道，将形成世界上直流输送功率最大、电压等级最高、落点最集中、结构最复杂的交直流混联电网。随着近几年来大量高压直流输电工程接入交流系统，给交直流混联电网特别是受端电网带来重要影响 [7-11] 。直流系统的运行状况，尤其是其控制保护系统的性能，已成为影响交直流混联电网安全稳定的重要因素。近些年，已发生多起在交流电网正常操作和故障情况下，因部分元件控制保护系统策略不当，导致直流功率异常波动甚至闭锁，给电网带来较大冲击的事故案例，包括交流故障后平波电抗器、等元件保护动作导致直流闭锁，严重影响了送受端电网的安全稳定和正常运行。例如2013年 7 月 5 日上海电网交流电网单相故障引起华东某 500kV 直流平波电抗器瓦斯继电器动作导致直流单极闭锁， 2010 年 2 月 7 日，华东某特 800kV 直流系统发生两次换相失败，受端换流站单元 II 平抗重瓦斯动作，单元 II 直流闭锁；等等，上述事故始终难以对关键设备事故过程进行精细化仿真和故障复现、分析，原因是现有直流仿真专注于电气量因素，缺乏平抗瓦斯这种能够直接闭锁直流的关键复杂非电气量的精细化仿真，使得事故重演和仿真分析造成一定的困难 [12-15]，另一方面，高压直流平抗瓦斯保护详细特性建模涉及电气量因素与非电气量因素复杂非线性动态耦合关系，也是交直流电网精细化仿真的一个难点，随着直流系统规模的增大和交直流系统耦合程度的密切，直流系统闭锁对电网安全稳定性的冲击巨大，对于平抗瓦斯这种频繁引发直流系统闭锁的关键非电气量因素与交直流电网的互动响应特性一直处于模糊状态是国家电网工程运行的各个部门所不能接受的；本论文基于国网专题科技项目采用技术采购方式使沈变公司提供了具有高商业价值的平抗瓦斯内部资料，详细研究分析了平抗瓦斯的设备原理和特点，采用 Gaussian 算法对平抗瓦斯机械振动与冲击电流的非线性耦合动态特性进行精细化模拟和解耦，在 ADPSS 中建模编程实现，且与电磁暂态直流工程算法相兼容，并基于国网仿真中心华东电网 ADPSS 纯电磁暂态实际工程控保算例进行交直流电网纯电磁仿真，可以详细描述交直流电网故障冲击电流等电气量动态变化对平抗瓦斯机械振动加速度非电气量的非线性快速响应特性，为实际工程中多次发生的平抗瓦斯误动导致直流闭锁的事故分析和故障重演、预防以及设备改进提供关键技术手段，对于进一步提高直流实用化工程仿真的多维度精度具有重要现实意义，并为其他非线性电气相关设备的详细建模提供思路。

2 平抗瓦斯特性分析

直流平抗瓦斯保护动作响应迅速灵敏，对绕组层间和匝间短路故障、套管内部故障、铁心故障、绕组内部断线及油面下降和绝缘劣化等多种类型故障均能动作灵敏[15]。直流平抗瓦斯继电器设备结构主要由壳体、顶盖和开关装置组成[15]。壳体由耐气候变化的铸铝合金做成，连接方式为法兰式，壳体上有玻璃视窗，可用来观察内部开关系统，也可通过其上的刻度值读出内部聚集气体的体积，玻璃视窗用一个可以旋转的金属翻盖进行保护[15]。顶盖部件包括接线盖、接线盒、检查钮、检查阀等，接线盒有两电缆出线口[15]。现场平抗瓦斯继电器与油枕相连的波纹管为软连接，与油箱连接为管道硬连接，形成悬梁臂结构。

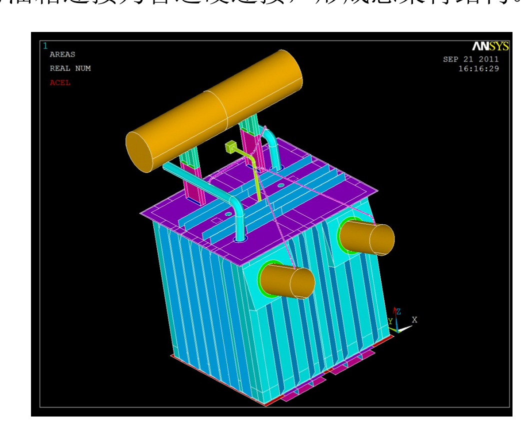


图 1 受端故障站平抗三维模拟图

Fig.1 3D simulation diagram of receiving end of

fault station



图 2 平波电抗器瓦斯继电器安装结构

Fig.2 Smoothing Reactor Gas Relay Field structure diagram

华东某 500kV 受端站 2012 年 7 月 3 日以来发生数十次双极换相失败，换相失败导致的暂态电流各不相同，平抗瓦斯的振动加速度也不同。需要对平抗瓦斯的振动加速度电气动态相关特性进行建模仿真。

3 平抗瓦斯特性建模

基于 Gaussian 算法[16-17]对直流平抗瓦斯建立如下模型，机械振动加速度 a_{vib} 可通过暂态冲击电流 I 进行动态相关特性计算，Gaussian 算法运用到定量分析模型中不仅简化了模型参数，而且提高了模型的可解释性[16-17]，并与电磁暂态积分算法相兼容。

$$a_{vib} = \lambda e^{(-((I-\varepsilon)/\gamma)^2)} \tag{1}$$

其中 λ 、ε 和 γ 是待求高斯系数，两边取对数可得：

$$ln(a_{vib}) = ln(\lambda) - \frac{\varepsilon^2}{\gamma^2} + \frac{2\varepsilon}{\gamma^2} I - \frac{I^2}{\gamma^2} \tag{2}$$

令 ： $�_0 - ln(\lambda) \quad \frac{\varepsilon^2}{\gamma^2}$

(3)

$$�_1 \quad \frac{2\varepsilon}{\gamma^2} \tag{4}$$

$$�_2 - \quad \frac{1}{\gamma^2} \tag{5}$$

$$\zeta = ln(a_{vib}) \tag{6}$$

令 ： $��\square_0 \quad +_1\square I \quad {}_2 \; I^2$

(7)

记 ： $读(\;_0,侣, \;_2) = \sum_{i=0}^{n} [\zeta_i - \;(I_i)]^2$

$$= \sum_{i=0}^{n} [\zeta_i - (�_0 \square \;_1 + I \square \;_2 \; I^2)]^2$$

(8)

计算偏导数：

$$\frac{读(侣_0, \;_1, \;_2)}{堵 \;_0} = 0$$
$$\frac{读(侣_0, \;_1, \;_2)}{堵 \;_1} = 0 \tag{9}$$
$$\frac{读(侣_0, \;_1, \;_2)}{堵 \;_2} = 0$$

展开可得：

$$\frac{�\sum_{i=0}^{n} [\zeta_i �(\square_0 \; +_1\square I \quad {}_2 \; I^2)]^2}{堵 \;_0} = 0$$
$$\frac{�\sum_{i=0}^{n} [\zeta_i �(\square_0 \; +_1\square I \quad {}_2 \; I^2)]^2}{堵 \;_1} = 0$$
$$\frac{�\sum_{i=0}^{n} [\zeta_i �(\square_0 \; +_1\square I \quad {}_2 \; I^2)]^2}{堵 \;_2} = 0$$

(10)

进而可求出：

$$\gamma=\{2\sum_{i=0}^{n}I_i\sum_{i=0}^{n}I_i^2\sum_{i=0}^{n}I_i^3-\left(\sum_{i=0}^{n}I_i^2\right)^3-\sum_{i=0}^{n}I_i^4\left(\sum_{i=0}^{n}I_i\right)^2\square\sum_{i=0}^{n}I_i^4-\sum_{i=0}^{n}I_i^2\sum_{i=0}^{n}\left(\sum_{i=0}^{n}I_i^3\right)^2\}^{\frac{1}{2}}/\{\sum_{i=0}^{n}I_i^2\zeta_i\left(\sum_{i=0}^{n}I_i\right)^2-\sum_{i=0}^{n}I_i\zeta_i\sum_{i=0}^{n}I_i\sum_{i=0}^{n}I_i^2-\sum_{i=0}^{n}I_i^3\sum_{i=0}^{n}\zeta_i\sum_{i=0}^{n}I_i+\sum_{i=0}^{n}\zeta_i\left(\sum_{i=0}^{n}I_i^2\right)^2\square\sum_{i=0}^{n}I_i^2\zeta_i+\sum_{i=0}^{n}I_i^2\sum_{i=0}^{n}I_i^3\sum_{i=0}^{n}I_i\zeta_i\}^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$$\varepsilon=\{\left(\sum_{i=0}^{n}I_i^2\right)^2\sum_{i=0}^{n}I_i\zeta_i\square\sum_{i=0}^{n}I_i^3-\sum_{i=0}^{n}I_i^2\zeta_i\sum_{i=0}^{n}I_i^4\sum_{i=0}^{n}I_i\zeta_i-\sum_{i=0}^{n}I_i\sum_{i=0}^{n}I_i^2\sum_{i=0}^{n}I_i^2\zeta_i+\sum_{i=0}^{n}I_i\sum_{i=0}^{n}I_i^4\sum_{i=0}^{n}\zeta_i-\sum_{i=0}^{n}I_i^2\sum_{i=0}^{n}I_i^3\sum_{i=0}^{n}\zeta_i\}/\{-2\{\sum_{i=0}^{n}I_i^2\zeta_i\left(\sum_{i=0}^{n}I_i\right)^2\square\sum_{i=0}^{n}I_i\zeta_i\sum_{i=0}^{n}I_i-\sum_{i=0}^{n}I_i^2\sum_{i=0}^{n}I_i^3\sum_{i=0}^{n}\zeta_i\sum_{i=0}^{n}I_i+\sum_{i=0}^{n}\zeta_i\left(\sum_{i=0}^{n}I_i^2\right)^2\sum_{i=0}^{n}I_i^2\zeta_i\sum_{i=0}^{n}I_i^2+\sum_{i=0}^{n}1\sum_{i=0}^{n}I_i^3\sum_{i=0}^{n}I_i\zeta_i\}\} \quad (12)$$

$$\lambda=exp\{\{\sum_{i=0}^{n}I_i^2\zeta_i\left(\sum_{i=0}^{n}I_i^2\right)^2\square\sum_{i=0}^{n}I_i\zeta_i\sum_{i=0}^{n}I_i^2-\sum_{i=0}^{n}I_i^3\sum_{i=0}^{n}I_i^4\sum_{i=0}^{n}\zeta_i\sum_{i=0}^{n}I_i^2+\sum_{i=0}^{n}\zeta_i\left(\sum_{i=0}^{n}I_i^3\right)^2\sum_{i=0}^{n}I_i\sum_{i=0}^{n}I_i^2\zeta_i\sum_{i=0}^{n}I_i^3+\sum_{i=0}^{n}I_i\sum_{i=0}^{n}I_i^4\sum_{i=0}^{n}I_i\zeta_i\}/\{\sum_{i=0}^{n}I_i^4\left(\sum_{i=0}^{n}I_i\right)^2\square 2\sum_{i=0}^{n}I_i\sum_{i=0}^{n}I_i^2+\sum_{i=0}^{n}I_i^3\left(\sum_{i=0}^{n}I_i^2\right)^3-\sum_{i=0}^{n}1\sum_{i=0}^{n}I_i^4\sum_{i=0}^{n}I_i^2+\sum_{i=0}^{n}\left(\sum_{i=0}^{n}I_i^3\right)^2\}-\{\left(\sum_{i=0}^{n}I_i^2\right)^2\sum_{i=0}^{n}I_i\zeta_i\square\sum_{i=0}^{n}I_i^3-\sum_{i=0}^{n}I_i^2\zeta_i\sum_{i=0}^{n}I_i^4\sum_{i=0}^{n}I_i\zeta_i-\sum_{i=0}^{n}I_i\sum_{i=0}^{n}I_i^2\sum_{i=0}^{n}I_i^2\zeta_i+\sum_{i=0}^{n}I_i\sum_{i=0}^{n}I_i^4\sum_{i=0}^{n}\zeta_i-\sum_{i=0}^{n}I_i^2\sum_{i=0}^{n}I_i^3\sum_{i=0}^{n}\zeta_i\}^2\}/\{4\sum_{i=0}^{n}I_i^4\left(\sum_{i=0}^{n}I_i\right)^2-2\sum_{i=0}^{n}I_i\sum_{i=0}^{n}I_i^2\sum_{i=0}^{n}I_i^3+\left(\sum_{i=0}^{n}I_i^2\right)^3-\sum_{i=0}^{n}1\sum_{i=0}^{n}I_i^4\sum_{i=0}^{n}I_i^2+\sum_{i=0}^{n}\left(\sum_{i=0}^{n}I_i^3\right)^2\}\{\sum_{i=0}^{n}I_i^2\zeta_i\left(\sum_{i=0}^{n}I_i\right)^2\square\sum_{i=0}^{n}I_i\zeta_i\sum_{i=0}^{n}I_i-\sum_{i=0}^{n}I_i^2\sum_{i=0}^{n}I_i^3\sum_{i=0}^{n}\zeta_i\sum_{i=0}^{n}I_i+\sum_{i=0}^{n}\zeta_i\left(\sum_{i=0}^{n}I_i^2\right)^2\sum_{i=0}^{n}I_i^2\zeta_i\sum_{i=0}^{n}I_i^2+\sum_{i=0}^{n}1\sum_{i=0}^{n}I_i^3\sum_{i=0}^{n}I_i\zeta_i\}\} \quad (13)$$

根据上述计算，可建立直流平抗瓦斯振动特性模型，在 ADPSS 中构建模型。

下面是所提出的上式（1-13）平抗瓦斯模型计算值在不同设备型号参数下与实测数据的对比效果，可以看出直流平抗瓦斯振动加速度与暂态冲击电流呈现不同类型的非线性相关性，与平抗瓦斯的设备型号和类型、结构有关，但是具有相似的模型动态变化特性，随着暂态冲击电流增大，

振动加速度增大率逐渐变小，电流增大造成的振动大小随动态特性不同而不同，改变设备结构可以改变暂态冲击电流与平抗瓦斯振动加速度之间的动态特性。

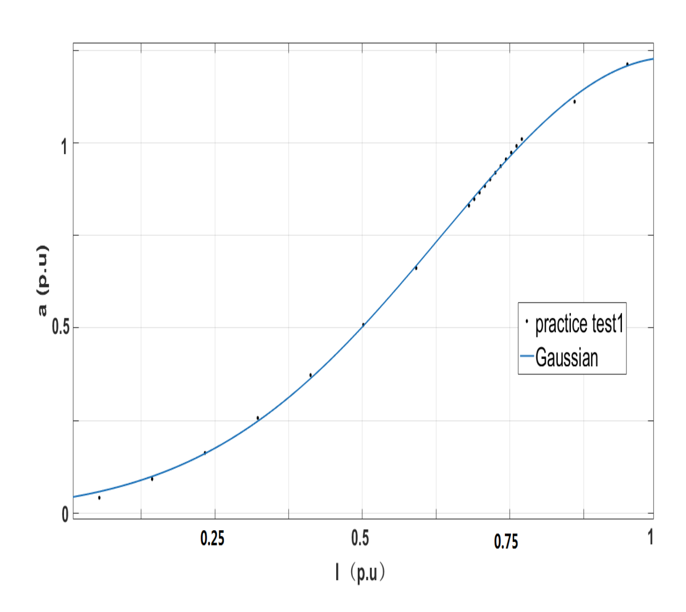


图 3　平抗瓦斯　I 模型对比曲线

Fig.3 Smoothing Reactor Gas Relay I Model Calculation Comparison Waveform

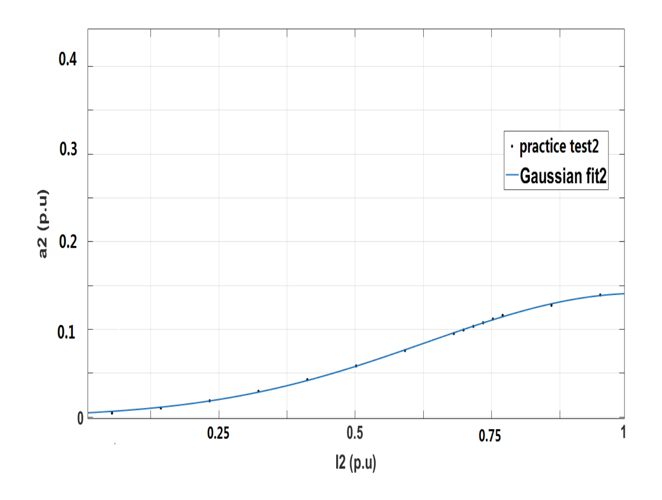


图 4　平抗瓦斯　II 模型对比曲线

Fig.4 Smoothing Reactor Gas Relay II Model Calculation Comparison Waveform

表 1　不同参数平抗瓦斯测试数据与模型效果对比

Tab.1　Comparison of gas resistance test data and model in different parameters

设备	*模型分析*	误差值
平抗瓦斯 I	*Max Error*	1.37%
	Min Error	3.9672e-02%
	SSE	4.996e+05
	R-square	0.9995
	Adjusted R-square	0.9994
	RMSE	171.4
平抗瓦斯 II	*Max Error*	1.40%
	Min Error	8.5744e-02
	SSE	2.274e+04
	R-square	0.9995
	Adjusted R-square	0.9994
	RMSE	43.53

表中参数说明：　SSE(和方差)：　The sum of squares due to error，是拟合数据和原始数据对应点的误差的平方和；R-square(确定系数) 是定义为 SSR 和 SST 的比值，　SSR：　Sum of squares of the regression，即预测数据与原始数据均值之差的平方和，　SST：　Total sum of squares ，即原始数据和均值之差的平方和；　RMSE(均方根)：Root mean squared error，也叫回归系统的拟合标准差，是 MSE 的平方根，　MSE(均方差)：Mean squared error，是预测数据和原始数据对应点误差的平方和的均值；Adjusted R-square: 校正决定系数是指决定系数 R 可以用来评价回归方程的优劣，对两个具有不同个数的自变量的回归方程进行比较时，还必须考虑方程所包含的自变量个数的影响。

4 ADPSS 工程算例仿真和故障反演

7.5 事故是交流系统故障导致直流换相失败，产生的系列连锁反应使得华东某 500kV 直流受端平抗瓦斯保护动作，在 ADPSS 仿真算例中以受端交流母线单相接地故障导致直流换相失败，基准容量 100MVA，　ADPSS 直流受端逆变侧近区 2s 时刻发生 A 相单相接地故障，故障持续时间 100ms，所采用的直流模型一次系统是国网调度中心提供的实际工程详细数据，直流控制系统逻辑来自工程中标方授权的实际应用国产化控制系统，整体算例经过国家电网仿真中心与实际工程多方位对比验证，研究结果对工程科研有实际指导意义。

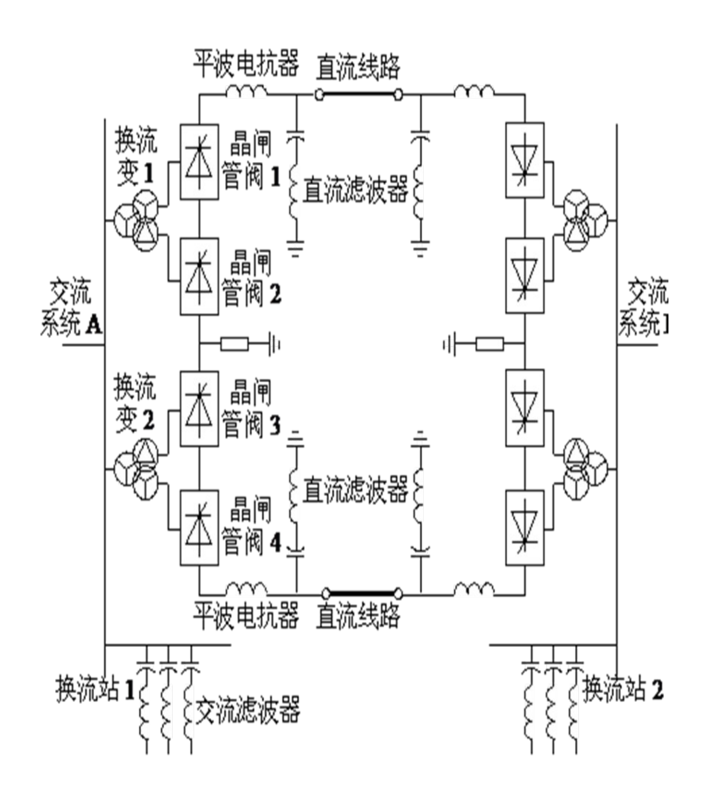


图 5 直流详细系统

Fig.5 HVDC detail system

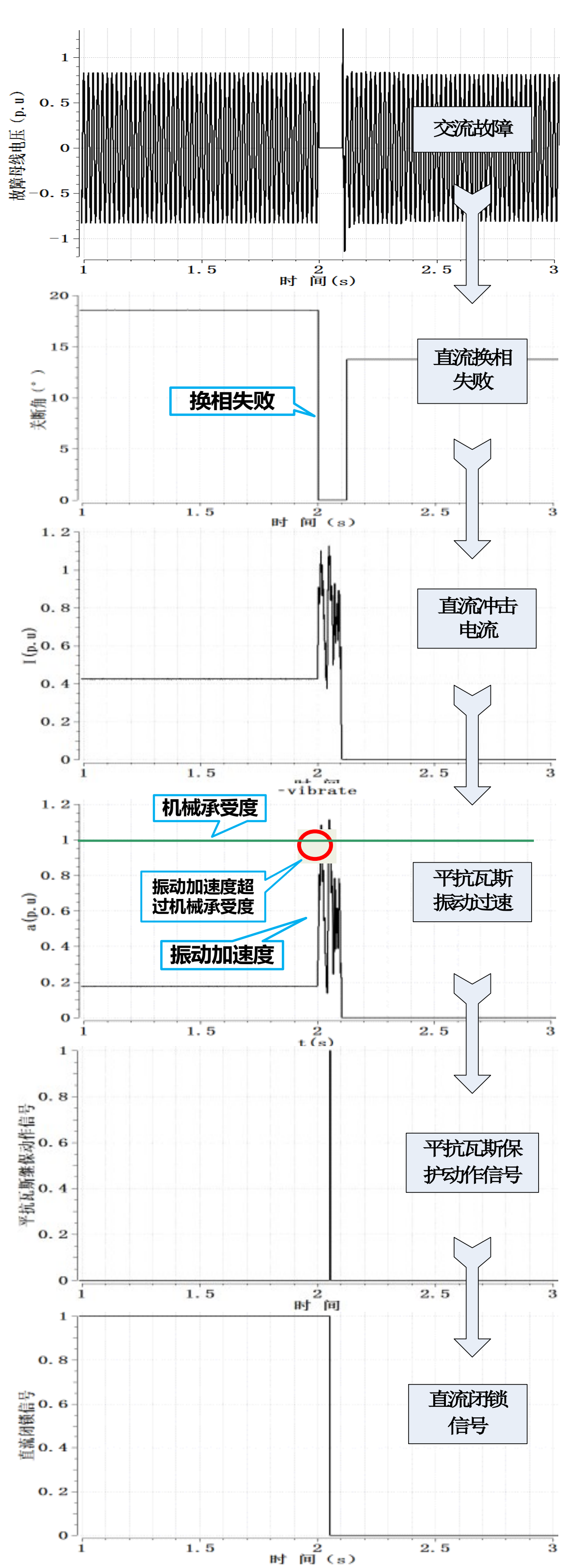


图 6 直流平抗瓦斯故障传导整体波形图

Fig.6 HVDC Smoothing Reactor Gas Relay Fault Conduction Waveforms

上图给出，文中把故障的传导关系用波形整体图直观的展现出来，可以看出：故障首先源自交流系统故障，引发直流换相失败，换相失败导致的直流暂态冲击电流产生机械力造成平抗本体及瓦斯继电器振动，同时平抗瓦斯继电器与油枕的悬梁臂结构放大了振动，引发平抗瓦斯机械振动加速度升级，当振动加速度超过机械承受度，使得挡板触头设定阈值的稳定性下降，压力波流冲击安装在流动绝缘油中的挡板，当压力波流的流速超过挡板的动作灵敏度，挡板顺压力波流方向运动 [15]，将浮子强力的推倒整定位置致使接点动作，发出跳闸信号，导致平抗重瓦斯误动作。

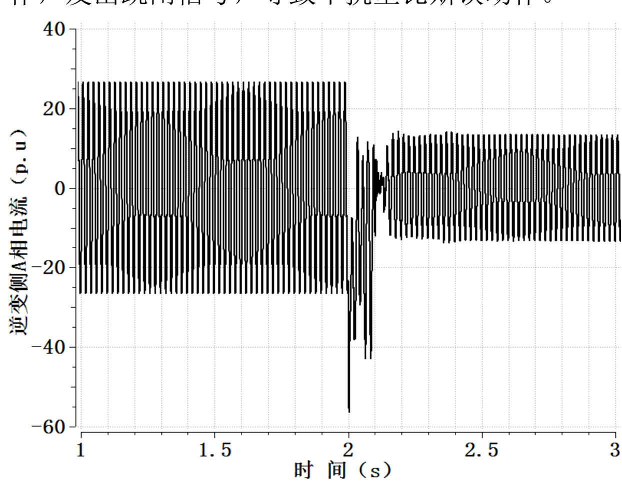


图 7 逆变侧交流电流

Fig.7 HVDC inverter side AC current

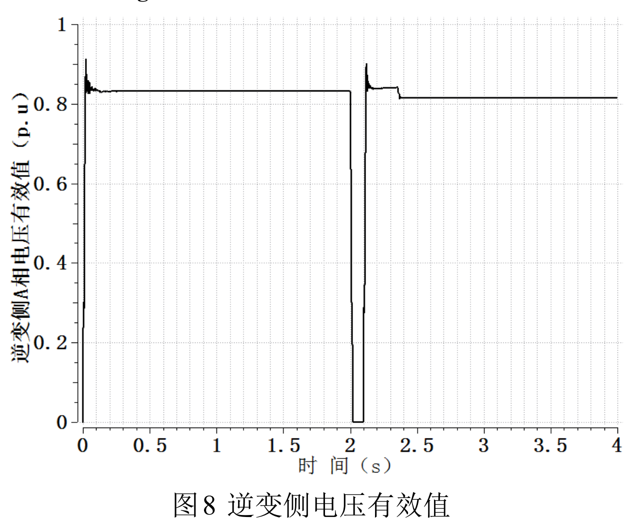


图 8 逆变侧电压有效值

Fig.8 HVDC inverter side AC voltage

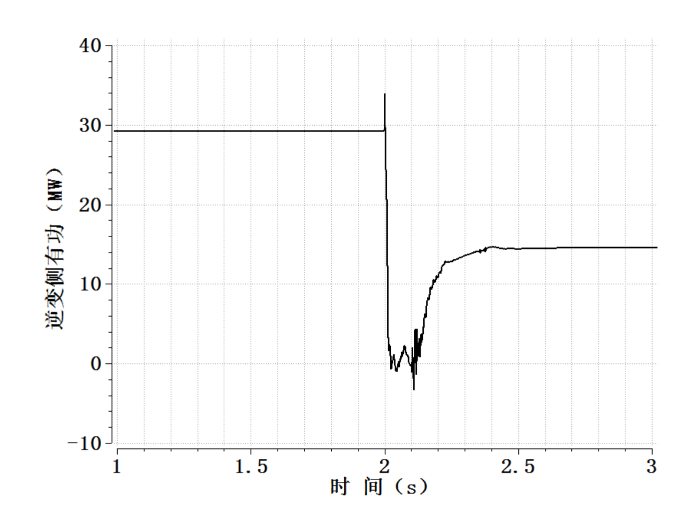


图 9 逆变侧有功功率

Fig.9 HVDC inverter side active power

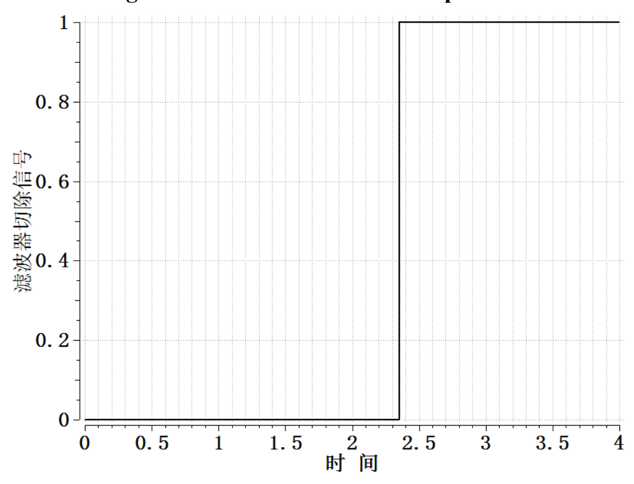


图 10 直流闭锁滤波器延时切除信号

Fig.10 HVDC blocking filter delay removal signal

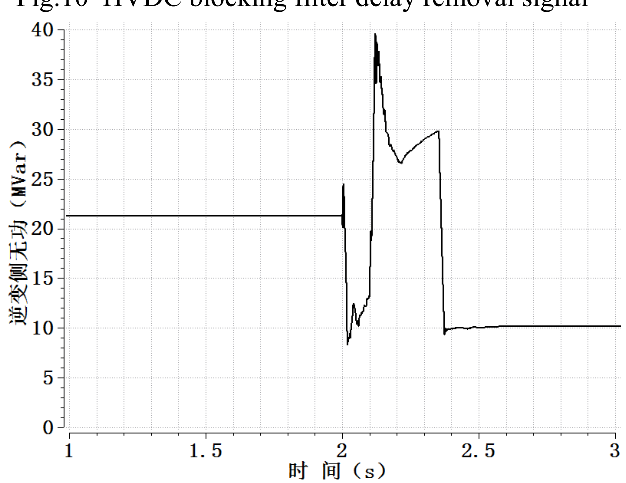


图 11 逆变侧无功功率

Fig.11 HVDC inverter side reactive power

从上图可看出：交流系统故障引发的暂态冲击电流使平抗瓦斯保护误动作，导致直流极 I 换流阀

闭锁，300ms后极I滤波器切除，对送受端交流系统的有功和无功造成冲击。根据本文提出的模型结合工程算例开展的上述初步故障反演可以较为详细的展现分析交直流联动故障过程中的关键设备动态特性、交直流电网的故障传导过程和暂态冲击影响。

5 结论

论文详细研究分析了直流平抗瓦斯的设备原理和特点，采用Gaussian算法对实际工程中多次导致直流闭锁的非电气量设备平抗瓦斯进行了电气相关动态特性建模，并在国内自主研发的ADPSS上进行了模型编程实现，且与直流电磁暂态工程计算相兼容，基于国家电网仿真中心国调华东工程算例对7.5事故进行了初步故障重演。论文对研究复杂大区交直流电网涉及非电气量的闭锁故障传导特性具有重要意义，为未来相关故障的预防、控制、改进等工作在理论和仿真手段上实现了关键功能的重要填补，对于进一步提高直流工程仿真的多维度精度具有重要现实意义，也为MCSR等其他非线性电气相关设备的详细建模提供思路。

参考文献

[1] 黄伟煌，饶宏，黄莹，李明，刘涛。一种基于常规直流输电系统的混合直流改造方案[J]。中国电机工程学报， 2017， 37（10）： 2861-2868
HUANG Weihuang, RAO Hong, HUANG Ying, LI Ming, LIU Tao. A Novel Refurbishment Scheme for Reforming the Existing LCC-HVDC to Hybrid HVDC[J]. Proceedings of the CSEE;2017,37 （10）： 2861-2868

[2] 刘昌盛，谢云云，周前，刘建坤，汪成根，殷明慧．高压直流输电参与的电网恢复路径优化方法研究[J]。中国电机工程学报， 2017， 37（9）： 2579-2588
LIU Changsheng, XIE Yunyun, ZHOU Qian, LIU Jiankun, WANG Chenggen, YIN Minghui， Optimization of Restoration Path for Blackout Grid With the Aid of High-voltage Direct Current Transmission[J]. Proceedings of the CSEE， 2017,37（9）： 2579-2588

[3] 杨亚宇 ，邰能灵 ，范春菊 ，刘琦 ，陈金祥。利用峰值频率的高压直流输电线路纵联保护方案[J]。 2015年 ,vol 35(0):1-11
YANG Yayu, TAI Nengling, FAN Chunju, LIU qi, CHEN Jinxiang; A Pilot Protection Scheme for HVDC Transmission Lines Based on Specific-Frequency[J]. 2015,vol 35(0):1-11,Proceedings of the CSEE

[4] 肖浩，朱佳，李银红，等．多馈入直流系统换相失败免疫水平快速确定方法研究 [J]．中国电机工程学报， 2015， 35(11)： 2711-2717．
Xiao Hao ， Zhu Jia ， Li Yinhong ， et al ． Study on rapid determination method of commutation failure immunity levels for multi-infeed HVDC transmission systems[J]． Proceedings of the CSEE ， 2015 ， 35(11) ： 2711-2717(in Chinese) ．．

[5] 李明节．大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制．电网技术， 2016， 40（4）： 985-991
Li Mingjie, Characteristic Analysis and Operational Control of Large-Scale Hybrid UHV AC/DC Power Grids[J]. power system, 2016 ， 40（4）： 985-991 ．

[6] 陈欢 ，王振 ，杨治中 ，蒋碧松 ，郭春义 ；并联混合直流输电系统中传统直流和柔性直流暂态无功协调控制策略研究 [J]. 电网技术，2017,6 。 vol 41(6):1719-1725 ．
CHEN Huan1, WANG Zhen1, YANG Zhizhong2, JIANG Bisong2, GUO Chunyi. Coordinated Reactive Power Control Approach for LCC-HVDC and VSC-HVDC in Hybrid Parallel HVDC System[J]. Power System technoloty; 2017,6.vol 41(6):1719-1725 ．

[7] Adam G P ， Davidson I E ． Robust and generic control of full-bridge modular multilevel converter high-voltage DC transmission systems[J] ． IEEE Transactions on Power Delivery ， 2015， 30(6)： 2468-2476．

[8] Zeng Rong， Xu Lie ， Yao Liangzhou ， et al． Precharging and DC fault ride-through of hybrid MMC-based HVDCsystems[J]． IEEE Transactions on Power Delivery， 2015， 30(3)： 1298-1306．

[9] Lujie Zhang; Andrew Ritter; Craig Nies; Suman Dwari; Ben Guo; Shashank Priya ; Voltage-Controlled Capaci-tor—Feasibility Demonstration in DC–DC

Converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics ; 08 February 2017 Volume:32, Issue:8, : 5889 - 5892

[10]
Chen Xia ， Sun Haishun ， Yuan Xufeng ， et a1; Integrating wind farm to the grid using hybrid multi-terminal HVDC technology[C]. IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference． Aiken ： IEEE， 2010： 1-6 ．

[11]
屠竟哲，张健，吴萍，等，多送出直流系统送端故障引发稳定破坏机理分析 [J] 。电力系统自动化，2015,39（ 20）： 146-150

Tu Jingzhe, Zhang jian, Wu ping, etal;Mechanisim analysis on instability caused by sending side contingencies of mul-tiple HVDC sending systems[J], automation of electric power systems

[12]
赵畹君．高压直流输电工程技术 [M] 。北京：中国电力出版社， 2004。

Zhao Wanjun ， HVDC power transmission project tech-nology[M]. Beijing: China electric press,2004.

[13]
Huang Weihuang， Li Ming， Xu Shukai， et al ． A novel control strategy for MMC-HVDC connected to passive networks[C]. CIGRE B4 Meeting and International Tutorials & Colloquium on HVDC and Power Electronics ． Agra： Cigre B4 ， 2015： 98-108 ．

[14]
Zheng Xiaodong ， Nengling Tai ， Guangliang Yang， etal ． A transient protection scheme for HVDC transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery ， 2012， 27(2)： 718-724．

[15]
姜海波，闰兴龙，孙亮，康建准。油浸式平波电抗器重瓦斯保护误动分析及防治措施 [J]。 高压电器，2015 年 12 月 16 日， vol ： 51（ 12）： 201-205

JIANG Haibo ， RUN Xinglong ， SUN Liang， KANG Jianzhun.Malfunction Analysis on Buchholz Relay of Oil-immersed Smoothing Reactor and Countermeasures[J]. High Voltage Apparatus， 2015,vol 51 （ 12）： 201-205.

[16]
Xiaolong Su. Applying Gaussian quantum discord to quantum key distribution[J]. Chinese Science Bulle -tin ， 2014-04-15.

[17]
Liu Yu;Dong Kai;Wang Haipeng;Liu Jun;He You,Adaptive Gaussian sum squared-root cubature Kalman filter with split-merge scheme for state estimation[J]. Chinese Journal of Aeronautics,2014-10-15。

收稿日期：

郑伟杰

作者简介：

郑伟杰(1982)，男，博士，高级工程师 CIGRE 会员、IEEE 会员，NSFC 评审专家北京市自然基金评审专家，主要研究方向电力系统运行与控制、电力系统仿真、电子与电能质量，dianlidianzi_@163. com。

（编辑 五号楷体，居右，段前空 6pt）

(责任编辑　李小丫)

“编辑” 五号黑体，编辑姓名楷体居右，段前空 6pt